ChinaXiv合作期刊

第 38 卷第 11 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.11
2018 年 6 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Jun.,2018

DOI: 10.5846/stxb201708141462
纪宇皝,张秋芳,周嘉聪,游章湉,徐鹏程,林伟盛,陈岳民,杨玉盛.亚热带地区竞争型和忍耐型树种叶片可溶性有机质数量及光谱学特征.生态学报,2018,38(11):3998-4007.
Ji Y H,Zhang Q F,Zhou J C,You Z T,Xu P C,Lin W S,Chen Y M,Yang Y S.Spectral characteristics and quantities of dissolved organic matter released from leaves with competitive and stress-tolerant ecological strategies in a subtropical region.Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3998-4007.

亚热带地区竞争型和忍耐型树种叶片可溶性有机质数量及光谱学特征

纪宇皝[1,2],张秋芳[1,2],周嘉聪[1,2],游章湉[1,2],徐鹏程[1,2],林伟盛[1,2], 陈岳民[1,2,*],杨玉盛[1,2]
1 福建师范大学地理科学学院,福州　350007
2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,福州　350007

摘要:气候变化下,不同生态策略的树种对环境变化有着不同的响应能力,影响其叶片淋溶产生的 DOM (Dissolved organic matter)的数量和质量,进而影响土壤的养分循环。通过探究亚热带地区不同生态策略树种叶片 DOM 数量及光谱学特征的差异,评估不同数量和结构特征 DOM 输入到土壤对养分循环的影响。本研究选取 6 种树种鲜叶进行浸提,其中竞争型(Competitive, C)和忍耐型(Stress-tolerant, S)各 3 种(树参(*Dendropanax dentiger*),黄绒润楠(*Machilus grijsii*),黄牛奶树(*Symplocos cochinchinensis* (Lour.)),细柄阿丁枫(*Altingia gracilipes*),丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)和罗浮栲(*Castanopsis faberi*))。通过溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、溶解性有机氮(Dissolved organic nitrogen, DON)表征 DOM 的数量特征,通过紫外吸收值(Special Ultraviolet-Visible Absorption, SUVA),腐殖化指标(Humification index, HIX)和傅里叶红外光谱(Fourier-transform infrared, FTIR)等光谱指标表征 DOM 质量特征。结果表明:不同生态策略树种的叶浸提液中可溶性有机碳浓度无显著差异,但是 C 策略树种浸提液中可溶性有机氮浓度大于 S 策略的 DON 浓度。此外,S 策略的芳香化指数(Aromatic index, AI)和腐殖化指数(HIX)均高于 C 策略。C 策略树种的发射荧光强度也高于 S 策略,说明 C 策略树种 DOM 腐殖化程度较低,易分解物质含量高;S 策略难分解物质多,腐殖化程度较高。傅里叶红外光谱结果表明,各树种叶浸提的 DOM 存在相似的吸收峰,其中以 H 键键合的—OH 伸缩振动最强且 C 策略树种结果相对简单,验证了荧光光谱的结果。总体而言,与 C 策略相比,S 策略树种叶片浸提的 DOM 结构更复杂,养分含量更高。这可能是因为,S 策略树种对环境变化具有更高的适应性。由于其 DOM 结构相对复杂,输入土壤后减缓土壤碳周转速率,在未来气候变化情景下,S 策略树种可能有利于土壤碳汇的形成。

关键词:CSR 策略;可溶性有机质;荧光光谱;芳香化指数;腐殖化指数

Spectral characteristics and quantities of dissolved organic matter released from leaves with competitive and stress-tolerant ecological strategies in a subtropical region

JI Yuhuang[1,2], ZHANG Qiufang[1,2], ZHOU Jiacong[1,2], YOU Zhangtian[1,2], XU Pengcheng[1,2], LIN Weisheng[1,2], CHEN Yuemin[1,2,*], YANG Yusheng[1,2]
1 *School of Geographical Sciences, Fujian Normal University*, *Fuzhou* 350007, *China*
2 *Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology*, *Fuzhou* 350007, *China*

Abstract: Plants have different ecological strategies in response to environmental stress under global climate change, and

基金项目:海峡联合基金项目(U1505233); 国家自然科学基金项目(31670620); 国家青年基金项目(41401555)
收稿日期:2017-08-14;　　**修订日期:**2018-03-06
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ymchen@ fjnu.edu.cn

chinaXiv:201806.00059v1

ChinaXiv合作期刊

the spectral characteristics and quantities of dissolved organic matter (DOM) leaching from leaves depend on the plant's ecological strategy. DOM leaching due to different strategies will influence soil nutrient cycling. The objective of this study was to investigate the differences in the spectral characteristics and quantities of DOM derived from leaves of plants (*Dendropanax dentiger*, *Machilus grijsii*, *Symplocos cochinchinensis* (Lour.), *Altingia gracilipes*, *Castanopsis fargesii*, and *Castanopsis faberi*) with different ecological strategies in a subtropical region. In this study, we sampled fresh leaves from 6 kinds of plants, including 3 competitive-type plants (C-strategy) and 3 stress-tolerant-type plants (S-strategy). We examined dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) to determine the quantities of DOM, and employed Special Ultraviolet-Visible Absorption (SUVA), Humification Index (HIX) and Fourier-Transform Infrared (FTIR) to analyze the spectral characteristics of DOM. The results showed that there were no significant differences in the DOC concentrations between C-type and S-type plants. However, DON was higher in C-type plants compared to S-type plants. In addition, we examined the structural characteristics of DOM between the C- and S-strategies using SUVA, fluorescence, and FTIR absorption spectrometry. The aromatic index and HIX were in the order: S > C. In addition, the synchronous fluorescence spectra were stronger in C-type compared to S-type plants, which suggests that DOM leaching from the leaves of a C-type plant was greater. The degree of humification was lower in the labile materials, while it was higher in the S-type plants. FTIR spectroscopy indicated that DOM from different types of leaves exhibited similar absorption peaks, with the strongest absorption arising from the prolonged vibration of H-bonding hydroxyl groups in all cases. This result shows that DOM from C-type plants has a simple structure that is in accord with fluorescence spectra. Overall, DOM from S-type plants was richer in nutrient composition and had a more complex structure compared to that from C-type plants. Our results suggested that S-type plants have better adaption under environment stress. Owing to the complex structure of DOM from S-type plants, it would reduce soil carbon turnover after leaching into the soil. Therefore, S-type plants are more effective in the formation of soil carbon sink under climate change.

Key Words: CSR theory; dissolved organic matter; fluorescence spectra; aromatic index; humification index

可溶性有机质(Dissolved organic matter, DOM)指可通过 0.45 μm 滤膜,能溶解于水、酸和碱性溶液中的有机物混合体,主要包括可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、可溶性有机氮(Dissolved organic nitrogen, DON)和可溶性有机磷(Dissolved organic phosphorus, DOP)等[1-3]。DOM 既能调节陆地生态系统内部各养分库之间的平衡,也能影响生态系统之间物质循环和能量流动[4-5]。森林生态系统中 DOM 主要来源于凋落物分解、穿透雨、树干茎流、根系分泌物及微生物新陈代谢过程等[6-9]。尤其是降雨淋溶的叶片 DOM,并且根据林冠层结构和组成的不同,其 DOM 的数量与质量也存在差异,且质量不同的 DOM 能激发土壤有机质的分解。因此其对陆地生物地球化学循环有着重要的意义[10]。

目前,我国湿润亚热带地区有着世界上面积最大、最典型的常绿阔叶林,其森林覆盖面积占全国森林总面积的 45.56%,是我国最重要的森林基地之一。并且,其年平均降雨量在 1552—2141 mm 之间,是我国降雨最丰富的地区之一[11]。与温带地区相比,本地区森林树种种类繁多,因此不同植物来源的 DOM 也可能具有不同的性状[12];同时,由于本地区具有温度高、湿度大,加上山高、坡陡,土壤风化程度高、抗侵蚀能力弱等特点,导致本地区森林生态系统 DOM 通量高于温带地区森林生态系统[13]。因此,与温带地区相比,叶淋溶的 DOM 在本地区的生态系统碳氮循环中扮演的角色可能更为重要[14]。众所周知,以全球变暖为主要变化特征的气候变化正在改变全球降水格局,高纬度区域降水增加,亚热带区域降水减少,干旱和极端降水情况频繁发生[15]。极端降水会改变水分过程,例如径流、土壤蒸发和渗透,进而改变植物的生理、种群和群落结构特征[16-17]。

有研究指出,不同类型植物叶淋溶的 DOM 有着不同的化学性状,其结构及分子量大小差异大,对地球生态化学循环的作用也不同[18-20]。随着化学分析手段的更新与发展,DOM 的化学组分分析取得了很大的进展。

chinaXiv:201806.00059v1
www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

除可见光谱分析得到广泛应用外,荧光光谱、红外光谱、核磁共振等现代光谱技术逐渐被引入到 DOM 的结构表征中,成为当前研究的热点[21-22]。如康根丽等[23]通过测定 DOM 紫外吸收值,腐殖化指数和红外光谱等指标研究米槠和杉木的 DOM 差异,结果发现米槠的 DOM 养分含量更高,结构更复杂,更有利于有机质的积累;Kiikkila 等[12]对比德国白桦和云杉不同分解层的 DOM 差异,发现源于白桦的 DOM 相比于源于云杉的 DOM 更容易被分解;Blschoff 等[24]通过测定山毛榉和云杉 DOM 的^{13}C 核磁共振,结果表明树种的差异影响 DOM 中难分解物质的含量。因此,植物叶片 DOM 数量特征与光谱特征的不同可能会间接影响土壤养分循环。

Grime 于 1974 年提出植被的主要生态策略可以分成 3 个类型:竞争型(Competitive, C)、草本型(Ruderal, R)和忍耐性(Stress-tolerant, S)[25-26]。不同生态策略的植被对环境变化有着不同的响应能力[27]。以往的研究重点主要为比较针阔树种的差异[18-19],而对不同生态策略植被叶淋溶 DOM 的研究较少。那么,在气候变化越演越烈的情况下,研究亚热带不同生态策略树种淋溶所产生 DOM 的数量及光谱学特征,对土壤的生物地球化学循环的研究具有重要的指导意义。

因此,本研究选址于福建三明格氏栲自然保护区,通过叶面积、比叶面积、叶干物质含量这 3 个核心性状[28]对本研究区内 45 种常见树种进行归纳,最终选取差异性较大的 C 策略与 S 策略树种各 3 种。通过室内实验浸提叶 DOM,分析其可溶性有机物的溶解特征和光谱学特征,以期探究不同生态策略树种叶 DOM 在森林生态系统的作用。本研究有助于揭示本地区土壤生物地球化学循化对气候变化的响应。

1 试验地概况

研究地点位于福建三明格氏栲自然保护区内(117°24′—117°27′E; 26°7′—26°10′N),该区位于福建武夷山东伸支脉地带,属低山丘陵,海拔约 250—500 m。林下土壤主要为暗红壤,其次为红壤和紫色土,属中亚热带季风型气候,年平均气温 19.5℃,年降水 1700 mm[29]。

保护区内共有维管束植物 110 种,隶属于 42 科 68 属。全区分为格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)群组和米槠(*Castanopsis carlesii*)群组,十二类群丛-格氏栲-马尾松(*Pinus massoniana*)群丛、格氏栲-木荷(*Schima superba*)群丛和米槠-格氏栲群丛,以及米槠-木荷群丛为该区分布较为广泛的类型。其中壳斗科(Fagaceae)、茶科(Theaceae)、松科(Pinaceae)、樟科(Lauraceae)、紫金牛科(Mysinaceae)和冬青科植(Aquifoliaceea)重要值都在 10 以上[29]。通过主成分分析对不同树种叶片性状进行综合分析,确定研究树种。本实验中选取差异性最大 C 策略和 S 策略树种,各选取 3 种(图 1),分别是树参(*Dendropanax dentiger*)、黄绒润楠(*Machilus grijsii*)、黄牛奶树(*Symplocos cochinchinensis*(Lour.))、细柄阿丁枫(*Altingia gracilipes*)、丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)和罗浮栲(*Castanopsis faberi*)。因为 R 策略多属于草本植物,所以在本研究没有涉及。

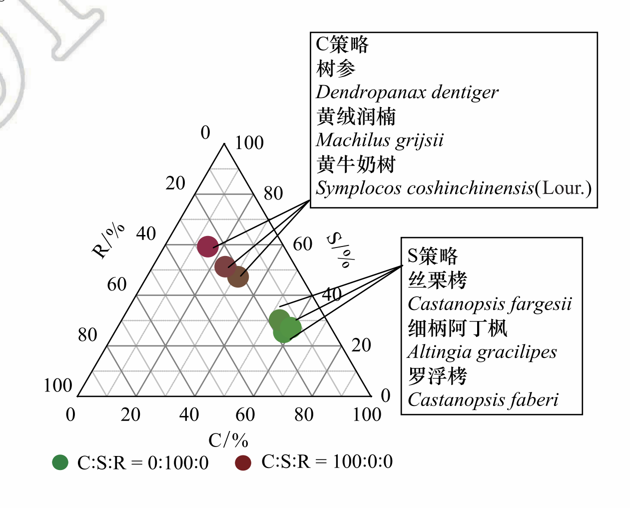


图 1 各物种 CSR 权衡策略分类

Fig 1 The CSR ecological strategies of different species

C:竞争型,Competitive; S:忍耐型,Stress-tolerant; R:草本型 Ruderal

2 研究方法

2.1 样本采集

于 2016 年 6 月至 8 月份对格氏栲保护区内的 45 种常见树种进行调查,随机选取胸径大于 10 cm 的成熟树木,人工攀爬至树木顶端,用修枝剪剪取向阳面枝条。选取成熟树木(胸径大于或等于 10 cm)叶片[30],随

chinaXiv:201806.00059v1

ChinaXiv合作期刊

机选取健康未损坏的叶片数枚,称取叶鲜重(LFW, g),随后使用 WinRHIZO/WinFOLIA 扫描仪(Régent Instruments, Quebec, Canada)测定叶面积(LA, cm^2),最后将叶片放于 65℃烘箱中烘 72 h 至恒重,称取叶干重(LDW, g),每个树种 3 个重复。计算比叶面积(SLA, cm^2/g)= LA/LDW,叶干物质含量(LDMC, 无量纲)= LDW/LFW[31]。

2.2 室内试验

DOM 的提取:分别准确称取 50 g 植物鲜样于 1 L 广口瓶中,加入 500 mL 超纯水混合。将溶液过 0.45 μm 滤膜(压力为-0.09 MPa),滤液中的有机物即为 DOM[30-32]。将待测滤液置于 4℃冰箱保存用以分析。其中,DOC 浓度用总有机碳分析仪(TOC-LCPH/CPN, 日本)测定,DON 浓度使用连续流动分析仪(Skalar san++, 荷兰)测定。

芳香化合物含量采用紫外可见光光谱测定。主要步骤为:用紫外-可见光分光度计(UV-2450, 日本岛津)测定待测液在 254 nm 的吸光度值(SUVA)[33],特定的紫外吸光值能够反映芳香化合物含量,也与通过液相^{1}H 核磁共振光谱测得的芳香化 H 的比例呈正相关[34]。计算芳香化指数(aromatic index, *AI*)[35]:

$$AI = SUVA254/C \times 100 \qquad (1)$$

式中,SUVA254 为 254 nm 的吸光度值(cm^{-1});*C* 为 DOC 浓度(mg/L)。

荧光腐殖化指数(Humification index, HIX)和发射腐殖化指数采用(Humification index, emission mode, HIX_{em})荧光光谱测定。主要步骤为:用荧光分光光度计(F-7000, 日立)测定样品的同步荧光及荧光发射光谱[36]。荧光腐殖化指数可用来表征 DOM 的腐殖化程度,HIX 越大,说明 DOM 中分子构成越复杂,π-π 共轭体系越大,腐殖类物质如缩合芳环和大分子化合物的含量越高[37]。同步腐殖化指数(humification index, synchronous mode, HIX_{syn})为同步荧光光谱中波长为 460 nm 和 345 nm 处荧光强度的比值。发射腐殖化指数为荧光发射光谱中波长 435—480 nm 与波长 300—345 nm 的面积比。为了提高灵敏度,去除碳酸盐的影响,荧光光谱测定前所有待测溶液的 pH 值用 2 mol/L 盐酸调成 2[33];由于荧光物质在高浓度时会发生荧光猝灭,高浓度样品的荧光图谱峰数量少而且荧光强度低,所以在光谱分析前,样品 DOC 浓度应调为 10 mg/L[38]。

傅里叶红外光谱测定:每个树种各取 1 mg 混合冷冻干燥样与 400 mg 干燥的 KBr (光谱纯)磨细混匀,在 10 t/cm^2压强下压成薄片并维持 1 min,用 FTIR 光谱仪(Nicolet Magna FTIR 550)分析红外光谱,波谱扫描范围为 4000—400 cm^{-1},每个样品扫描 64 次并记录其光谱[37],红外吸收峰的主要归属如表 1[39]所示。

表 1　红外吸收峰的主要归属[39]

Table 1　Main attribution of infrared absorption peaks[39]

波数 Wave Number/nm	主要归属 Main Attribution
3300—3600	氢键中结合的—COOH、醇及苯酚中—OH 的伸缩振动,N—H 的伸缩振动
2850—3000	脂肪族 C—H、$C—H_2$、$C—H_3$的伸缩振动
1625—1720	木质素中与芳香环相连的 C ═O 伸缩振动以及有机羧酸盐 COO—的反对称伸缩振动
1300—1475	饱和 C—H 面内弯曲振动
1000—1260	多糖类、醇类、羧酸类及酯类 C—O 的伸缩振动
605—880	羧酸化合物中 O—H 变形振动或苯环 C—H 面外的弯曲振动

2.3 数据处理与分析

采用 CSR 分析工具‘StrateFy’[30]对 45 种植物的生态策略计算分析;采用 SPSS 20.0 统计软件对不同树种叶 DOM 各指标进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行不同树种之间各个指标的显著性检验。绘图由 Origin 9.0 和 Sigmaplot 软件完成。

3 结果

3.1 不同生态策略树种 DOM 数量特征

C 策略与 S 策略树种的 DOC 浓度均值分别为 579.01 mg/L 和 453.36 mg/L,不同策略树种的 DOC 浓度无

chinaXiv:201806.00059v1

ChinaXiv合作期刊

显著差异(图2)。其中,黄绒润楠的DOC浓度显著最高,树参DOC浓度最低,且黄绒润楠DOC浓度是树参浓度的7.5倍(图2)。C策略与S策略树种的DON浓度均值分别为2.07 mg/L和1.17 mg/L,C策略树种的平均DON浓度高于S策略树种,其中黄牛奶树DON浓度最高,罗浮栲DON浓度最低,黄牛奶树DON浓度是罗浮栲的4.4倍(图2)。

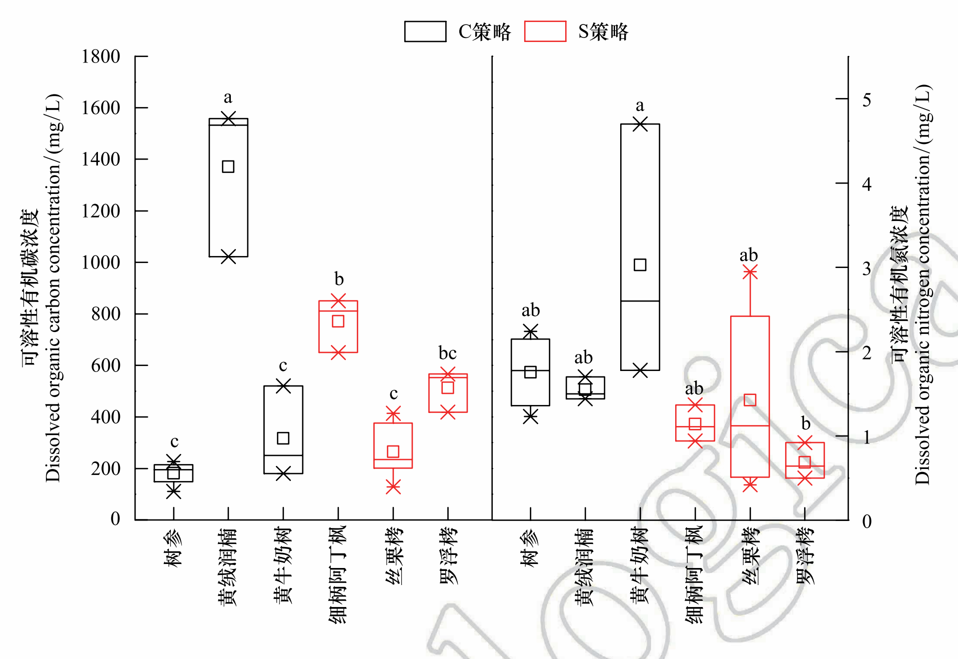


图2 不同生态策略树种叶浸提液DOC和DON浓度

Fig.2 The DOC and DON concentration of leaf extract from different ecological strategies

不同字母代表不同树种之前存在显著差异;DOC:可溶性有机碳,Dissolved organic carbon;DON:可溶性有机氮,Dissolved organic nitrogen

3.2 不同生态策略树种DOM光谱特征

C策略与S策略树种的AI均值分别为0.94 L mg^{-1} cm^{-1}和2.25 L mg^{-1} cm^{-1},C策略AI值显著低于S策略。其中,黄牛奶树的AI值最低,罗浮栲的AI值最高(图3)。

从发射腐殖化指数上看,C策略树种腐殖化程度整体低于S策略树种(图4)。其中丝栗栲的发射腐殖化指数值最高,黄绒润楠的发射腐殖化指数值最低。尽管C策略树种同步腐殖化指数的结果整体低于S策略树种,但是两策略树种的同步腐殖化指数无显著差异(图4)。

发射荧光光谱中,C策略和S策略树种均在506 nm处有吸收峰(图5)。除黄绒润楠在330 nm出现小峰外,不同树种的光谱特征趋于一致。C策略树种的发射荧光强度高于S策略。黄牛奶树峰值处荧光强度最高,罗浮栲峰值处荧光强度最低。

在同步荧光光谱中,两种策略树种在286 nm处均存在吸收峰。C策略树种荧光强度略高于S策略树种。黄绒润楠的峰值处荧光强度最高(图6)。

傅里叶红外光谱已经被广泛的应用于测定DOM总的特性,有助于我们了解DOM重要的结构信息,如:含

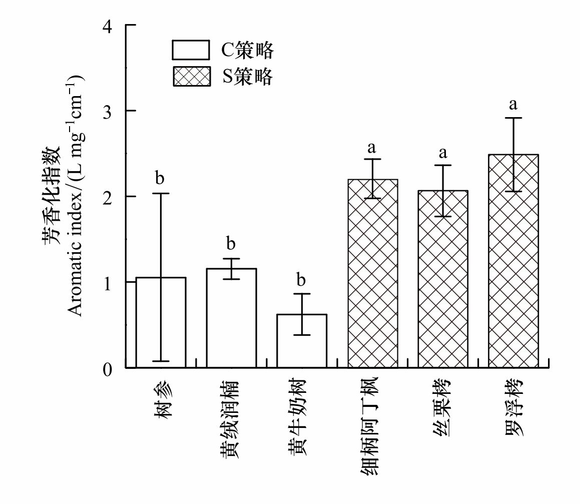


图3 不同生态策略树种叶浸提液DOM芳香化指数

Fig.3 The DOM aromatic index of leaf extract from different ecological strategies

DOM:可溶性有机质,Dissolved organic matter

chinaXiv:201806.00059v1

ChinaXiv合作期刊

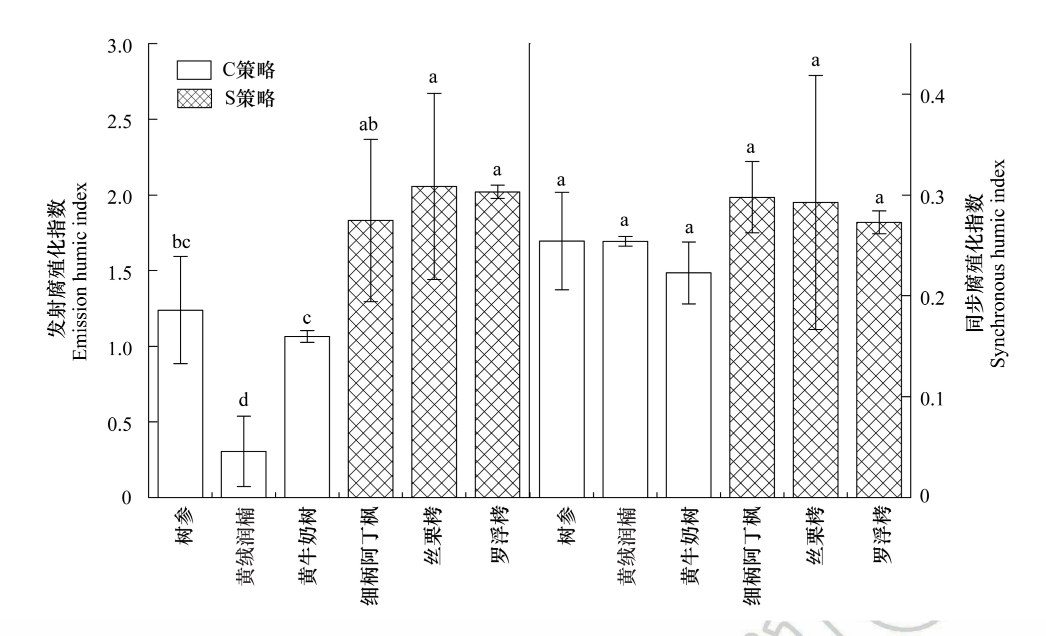


图 4　不同生态策略树种叶浸提液 DOM 发射腐殖化指数和同步腐殖化指数

Fig.4　The DOM emission humic index and synchronous humic index of leaf extract from different ecological strategies

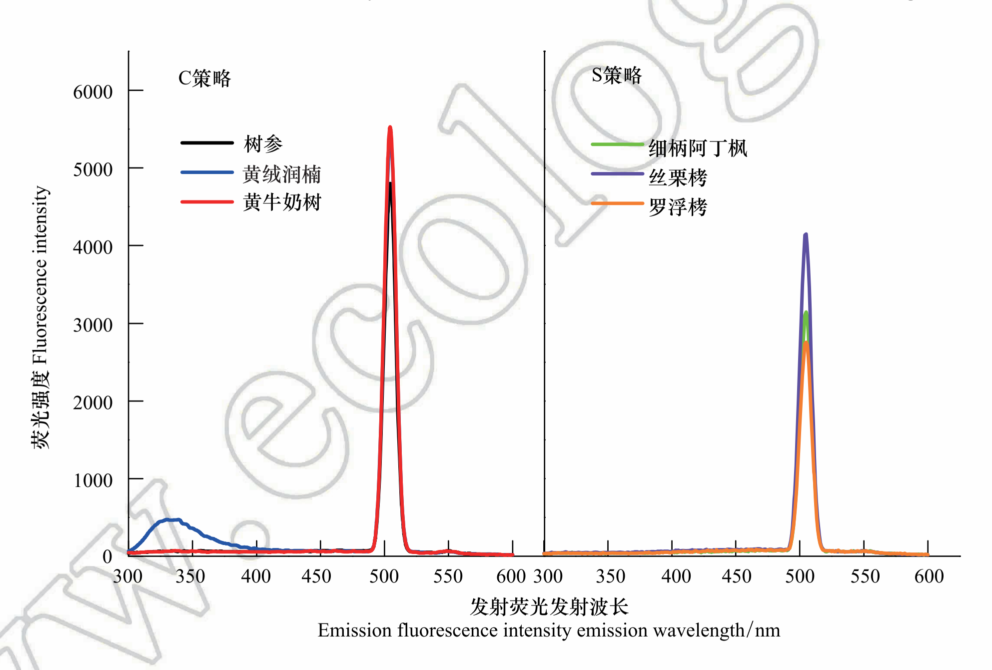


图 5　不同生态策略树种叶浸提液 DOM 发射荧光光谱特征

Fig.5　The DOM emission fluorescence intensity emission of leaf extract from different ecological strategies

氧官能团、碳水化合物基团和芳香族和脂肪族的相对丰度。不同树种叶片 DOM 的红外吸收峰主要分布在 6 个区域(图 7)。6 种树种叶片淋溶叶均在 3300—3600 cm^{-1}范围内有一个强而宽的吸收峰。尽管各树种红外光谱峰位置基本一致,但吸收率有所差异,如丝栗栲在红外光谱图中各波段吸收峰中峰值最高,罗浮栲峰值最低(图 7)。总体来说,S 策略树种在短波区域中出的峰多于 C 策略。

4　讨论

4.1　不同生态策略树种 DOC 和 DON 浓度的差异

通过降水淋溶的叶片 DOM 是土壤 DOC 的主要来源之一,因此淋溶的叶片 DOM 的质和量在森林土壤养

chinaXiv:201806.00059v1
www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

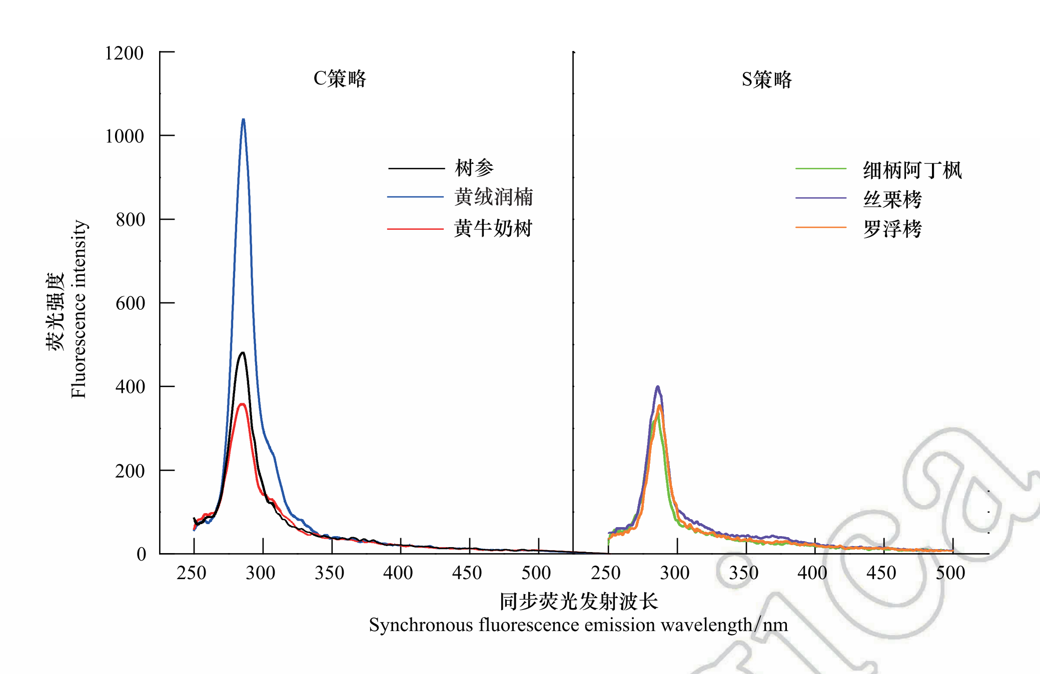


图 6 不同生态策略树种叶浸提液 DOM 同步荧光光谱特征

Fig.6 The DOM synchronous fluorescence intensity emission of leaf extract from different ecological strategies

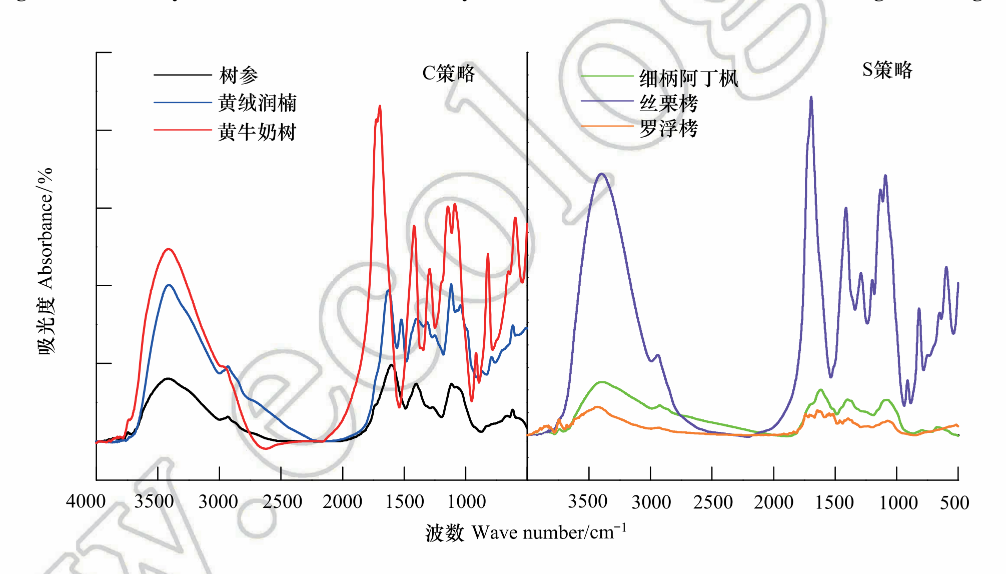


图 7 不同生态策略树种叶浸提液 DOM 红外光谱

Fig.7 The DOM infrared spectra of leaf extract from different ecological strategies

分循环中起着重要作用[19]。通过对比温带森林系统 DOC 含量(3—35 mg /L)[40],结果发现本研究中各树种叶浸提的 DOC 浓度均高于温带森林中 DOC 含量,说明本研究区 DOC 通量较大。吕茂奎等[10]研究表明,米槠鲜叶(前期研究结果表明米槠为 S 策略树种)浸提的 DOM 中的 DOC 含量大于杉木鲜叶(前期研究结果表示杉木为 C 策略树种)浸提 DOM 中 DOC 含量,这与本试验结果并不一致。导致结果不同的原因可能是 DOM 中 DOC 含量不仅仅与植物的生长策略有关,同时可能还与叶片的质量和结构的差异有关。

本研究中,C 策略树种浸提的叶 DON 浓度均高于 S 策略(图 2),可能是因为 C 策略树种是快速投资收益型[41-43],在生长过程中将较多的养分通过淋溶作用输入到土壤中,加快养分循环。而 S 策略树种为慢速投资型[41-43],主要将养分用以自身生长和器官构建,淋溶产出的 DON 含量较少。康根丽等[21]认为米槠人促更新林淋溶产出的 DOM 更有利于土壤氮素的积累。因此,从生态策略的角度来看,与 S 策略树种相比,C 策略树种 DON 浓度更高,进而提高土壤中的氮素有效性。

chinaXiv:201806.00059v1
www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

4.2 不同生态策略树种光谱特征

Wieder 等[13]研究表明不同植被淋溶产生的 DOM 由于其化学性状的差异与土壤矿物会产生不同的物理吸附作用,这将会对土壤易变碳库产生巨大的作用。因此,尽管本试验中 DOM 的数量并无显著差异,但是 DOM 的质量可能是影响其在土壤中参与生物化学地球循环的关键。其中,DOM 的芳香性指数越高,表明其含有的芳香族化合物越多[44]。类似的,腐殖化指数越高,表明 DOM 中含有更多浓缩的芳香环难分解组分[38]。本研究中,S 策略叶浸提 DOM 中的芳香性指数与腐殖化指数均高于 C 策略(图 2,图 3)。说明 S 策略树种叶 DOM 中具有更多不饱和键和芳香族化合物,这可能不利微生物活性和新陈代谢[45],有利于土壤肥力的维持和碳汇的形成。

同步荧光光谱和发射荧光光谱的结果发现,各树种的特征峰主要出现在 λ_{ex}278—285 nm(图 5),此特征峰代表类蛋白质基团[46]。由此看出,六种树种叶 DOM 中蛋白质基团丰富,而其他基团如木质素基团或脂肪族基团含量较少。与 S 策略相比,C 策略同步荧光强度较强,说明 C 策略中的蛋白质基团多于 S 策略,C 策略叶 DOM 中易分解物质较多。本研究中 C 策略树种叶浸提 DOM 荧光强度均高于 S 策略树种。Kaiser 等[47]研究发现发射荧光光谱波长较短、荧光强度较高的特征峰说明该物质中含有分子结构简单、缩聚程度较低的易分解有机物,而波长较长的特征峰结果与之相反。这更进一步说明本研究区 S 策略树种腐殖化程度较高,缩合芳环物质和大分子物质比 C 策略树种多;C 策略树种腐殖化程度较低,其易分解物质含量较为丰富。这一结果与芳香性指数、腐殖化指数和同步荧光光谱结果一致。吕茂奎等[10]也发现米槠叶片浸提液 DOM 结构明显比杉木复杂。由此表明 S 策略树种叶 DOM 可能更有利于土壤腐殖质的形成,倾向于储存养分以供长期生长的需求。而 C 策略树种则是快速投资收益型,叶 DOM 的易分解组分较多,容易被土壤微生物和植物根系利用,使得树木生长较快。这一结果符合 Grime 等[48]对 CSR 策略树种的定义:根据权衡策略,在未受到干扰的地区,C 策略树种有相对较高的资源获取能力;在强干扰地区,C 策略的相似功能性状并没有选择优势。而 S 策略树种在应对环境变化时有着相对较强的抵抗能力。因此,在未来水热条件发生变化的情况下,S 策略树种会比 C 策略树种具有更强的适应能力,这可能对土壤生态系统碳循环过程具有重要影响。

红外光谱可以准确监测到 DOC 中苯酚和多糖类物质的振动,本研究结果发现各树种的傅里叶红外光谱出现吸收谱带的位置均相似,表明不同策略树种的 DOM 结构具有相似性[38]。本研究中六种不同树种强度的最大的吸收处于 3400—3550 cm^{-1},该吸收峰归属于 H 键键合的-OH 的伸缩振动,其羟基主要来源于样品中的结构性碳水化合物和非结构性碳水化合物。1629—1700 cm^{-1}处吸收峰最强,归属于有机羧酸盐的反对称伸缩振动以及木质素中与芳香环相连的 C=O 伸缩振动。1000—1260 cm^{-1}处吸收峰为碳水化合物中 C-O 的伸缩振动;在 1145—1149、600—870 与 3400—3550 cm^{-1}均存在吸收峰,说明叶浸提 DOM 中存在醇类和酚类物质。但是 S 策略树种叶 DOM 在低波段处的振动较强,则说明 S 策树种中大分子官能团较多。这一结果与芳香性指数、腐殖化指数以及荧光光谱的结果一致。Bu 等[37]有类似结果。周江敏等[33]研究表明,土壤 DOM 中 C、H 饱和程度高,芳香族类不饱和物质较少,且富含碳水化合物、羧基或羟基类物质。这说明土壤 DOM 与叶 DOM 结构差异较大,地上部分 DOM 输入土壤系统后其结果会发生一系列复杂的物理化学反应。

总的来说,由于 S 策略有着更好的适应能力[28],因此在干旱和暴雨频发的亚热带地区,S 策略在该生态系统占主导地位。且由于其 DOM 结构复杂的特征,因此在未来,S 策略树种可能对森林碳汇起着重要的作用。

另外,由于红外光谱测定方式只能对样本进行半定量分析[49]。本研究中不同树种之间红外光谱结果的吸光值具有差异,但是其出峰位置并无太大差别。在未来还可以尝试更精准的光谱手段(核磁共振)探究不同树种叶浸提液的官能团化学结构。

5 结论

本研究通过对比不同生态策略树种的 DOM 数量特征和光谱特征,结果发现 C 策略树种的 DOM 结构更

chinaXiv:201806.00059v1

ChinaXiv合作期刊

加简单,且 DON 输入量较大,能够更快地被土壤微生物利用,加快养分循环,促进植物生长。而 S 策略树种叶 DOM 长期来看可能有利于土壤维持土壤肥力。在全球气候变化剧烈的背景下,不同生态策略的植被对环境变化有着不同的响应能力,从而导致不同生态策略树种的 DOM 输入土壤的比例变化,最终可能影响土壤生物地球化学循环。总得来说,面对干扰时,S 策略树种相比于 C 策略树种具有更高的适应性。由于 S 策略树种 DOM 结构相对复杂,输入土壤后减缓土壤碳周转速率,因此未来气候变化情景下,S 策略树种可能将有利于土壤碳汇的形成。

参考文献(References):

[1] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter. Environmental Science & Technology, 2002, 36(4): 742-746.

[2] 杨玉盛, 林瑞余, 李庭波, 董彬, 王小国, 郭剑芬. 森林凋落物淋溶中的溶解有机物余紫外可见光谱特征. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(2):124-128.

[3] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其土壤养分的关系. 生态学报, 2005, 25(6): 1299-1305.

[4] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.

[5] Terajima T, Moriizumi M. Temporal and spatial changes in dissolved organic carbon concentration and fluorescence intensity of fulvic acid like materials in mountainous headwater catchments. Journal of Hydrology, 2013, 479: 1-12.

[6] Guggenberger G, Christensen B T, Zech W. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature. European Journal of Soil Science, 1994, 45(4): 449-458.

[7] McDowell W H, Currie W S, Aber J D, Yano Y. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils. Water, Air, and Soil Pollution, 1998, 105(1/2): 175-182.

[8] McDowell W H. Dissolved organic matter in soils—future directions and unanswered questions. Geoderma, 2003, 113(3/4): 179-186.

[9] Cawley K M, Yamashita Y, Maie N, Jaffé R. Using optical properties to quantify fringe Mangrove inputs to the dissolved organic matter (DOM) pool in a subtropical estuary. Estuaries and Coasts, 2014, 37(2): 399-410.

[10] 吕茂奎, 谢锦升, 江淼华, 罗水金, 曾少娟, 纪淑蓉, 万菁娟, 杨玉盛. 米槠常绿阔叶次生林和杉木人工林穿透雨和树干径流可溶性有机质浓度和质量的比较. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2201-2208.

[11] Liu X F, Lin T C, Yang Z J, Vadeboncoeur M A, Lin C F, Xiao D C, Lin W S, Chen G S, Xie J S, Li Y Q, Yang Y S. Increased litter in subtropical forests boosts soil respiration in natural forests but not plantations of *Castanopsis carlesii*. Plant and Soil, 2017, 418(1/2): 1-11.

[12] Kiikkilä O, Kitunen V, Smolander A. Chemical and biological characterization of dissolved organic matter derived from Norway spruce litter divided into fractions according to molecular size. European Journal of Soil Biology, 2012, 50: 109-111.

[13] Wieder W R, Cleveland C C, Townsend A R. Throughfall exclusion and leaf litter addition drive higher rates of soil nitrous oxide emissions from a lowland wet tropical forest. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3195-3207.

[14] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Yin Y F, Gao R, Lin C F. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. Plant and Soil, 2009, 323(1/2): 153-162.

[15] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[16] Carnicer J, Coll M, Ninyerola M, Pons X, Sánchez, G, Peñuelas J. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108 (4): 1474-1478.

[17] Fauset S, Baker T R, Lewis S L, Feldpausch T R, Affum-Baffoe K, Foli E, Hamer K C, Swaine M D. Drought-induced shifts in the floristic and functional composition of tropical forests in Ghana. Ecology Letters, 2012, 15(10): 1120-1129.

[18] Wieder W R, Cleveland C C, Townsend A R. Tropical tree species composition affects the oxidation of dissolved organic matter from litter. Biogeochemistry, 2008, 88(2): 127-138.

[19] Uselman S M, Qualls R G, Lilienfein J. Quality of soluble organic C, N, and P produced by different types and species of litter: root litter versus leaf litter. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 54: 57-67.

[20] Cuss C W, Guéguen C. Distinguishing dissolved organic matter at its origin: size and optical properties of leaf-litter leachates. Chemosphere, 2013, 92(11): 1483-1489.

[21] Kazakou E, Garnier E, Navas M L, Roumet C, Collin C, Laurent G. Components of nutrient residence time and the leaf economics spectrum in species from Mediterranean old-fields differing in successional status. Functional Ecology, 2007, 21(2): 235-245.

[22] Chen M L, Kim S, Park J E, Kim H S, Hur J. Effects of dissolved organic matter (DOM) sources and nature of solid extraction sorbent on recoverable DOM composition: implication into potential lability of different compound groups. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2016, 408 (17): 4809-4819.

[23] 康根丽, 杨玉盛, 司友涛, 尹云锋, 刘翥, 陈光水, 杨智杰. 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征. 生态学报, 2014, 34(8): 1946-1955.

chinaXiv:201806.00059v1

www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

[24] Bischoff S, Schwarz M T, Siemens J, Thieme L, Wilcke W, Michalzik B. Properties of dissolved and total organic matter in throughfall, stemflow and forest floor leachate of central European forests. Biogeosciences, 2015, 12(9): 2695-2706.

[25] Grime J P. Vegetation classification by reference to strategies. Nature, 1974, 250(5461): 26-31.

[26] Grime J P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. The American Naturalist, 1977, 111(982): 1169-1194.

[27] Grime J P. The C-S-R model of primary plant strategies-origins, implications and tests//Gottlieb L D, Jain S K, eds. Plant Evolutionary Biology. Dordrecht: Springer, 1988: 371-393.

[28] Pierce S, Negreiros D, Cerabolini B E L, Kattge J, Díaz S, Kleyer M, Shipley B, Wright S J, Soudzilovskaia N A, Onipchenko V X, van Bodegom P M, Frenette-Dussault C, Weiher E, Pinho B X, Cornelissen J H C, Grime J P, Thompson K, Hunt R, Wilson P J, Buffa G, Nyakunga O C, Reich P B, Caccianiga M, Mangili F, Ceriani R M, Luzzaro A, Brusa G, Siefert A, Barbosa N P U, Chapin III F S, Cornwell W K, Fang J Y, Fernandes G W, Garnier E, Le Stradic S, Peñuelas J, Melo F P L, Slaviero A, Tabarelli M, Tampucci D. A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes world-wide. Functional Ecology, 2017, 31(2): 444-457.

[29] 游水生, 郭振庭. 用模糊聚类探讨福建三明格氏栲自然保护区植被类型的划分. 植物科学学报, 1994, 12(4): 333-340.

[30] 周江敏, 代静玉, 潘根兴. 应用光谱分析技术研究土壤水溶性有机质的分组及其结构特征.光谱学与光谱分析, 2004, 24(9): 1060-1065.

[31] Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte M S, Cornwell W K, Craine J M, Gurvich D E, Urcelay C, Veneklaas E J, Reich P B, Poorter L, Wright I J, Ray P, Enrico L, Pausas J G, de Vos A C, Buchmann N, Funes G, Quétier F, Hodgson J G, Thompson K, Morgan H D, ter Steege H, van der Heijden M G A, Sack L, Blonder B, Poschlod P, Vaieretti M V, Conti G, Staver A C, Aquino S, Cornelissen J H C. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany, 2013, 61(3): 167-234.

[32] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应. 生态学报, 2002, 22(2):259-269.

[33] Akagi J, Zsolnay Á, Bastida F. Quantity and spectroscopic properties of soil dissolved organic matter (DOM) as a function of soil sample treatments: air-drying and pre-incubation. Chemosphere, 2007, 69(7): 1040-1046.

[34] Kalbitz K, Schwesig D, Schmerwitz J, Kaiser K, Haumaier L, Glaser B, Ellerbrock R, Leinweber P. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(8): 1129-1142.

[35] Saadi I, Borisover M, Armon R, Laor Y. Monitoring of effluent DOM biodegradation using fluorescence, UV and DOC measurements. Chemosphere, 2006, 63(3): 530-539.

[36] 刘翥, 杨玉盛, 司友涛, 康根丽, 郑怀舟. 植被恢复对侵蚀红壤可溶性有机质含量及光谱学特征的影响. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1174-1183.

[37] Bu X L, Wang L M, Ma W B, Yu X N, McDowell W, Ruan H H. Spectroscopic characterization of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types along an elevation gradient in the Wuyi Mountains. Geoderma, 2010, 159(1/2): 139-146.

[38] Bu X L, Ding J M, Wang L M, Yu X N, Huang W, Ruan H H. Biodegradation and chemical characteristics of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types in the Wuyi Mountains, southeastern China. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(2): 102-107.

[39] Klaus K, Zech W. Natural organic matter sorption on different mineral surfaces studied by DRIFT spectroscopy. Sciences of Soils, 1997, 2: 71-74.

[40] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H, Solinger S, Matzner E. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen-a synthesis for temperate forests. Biogeochemistry, 2001, 52(2): 173-205.

[41] Santiago L S. Extending the leaf economics spectrum to decomposition: evidence from a tropical forest. Ecology, 2007, 88(5): 1126-1131.

[42] Freschet G T, Cornelissen J H C, van Logtestijn R S P, Aerts R. Evidence of the 'plant economics spectrum' in a subarctic flora. Journal of Ecology, 2010, 98(2): 362-373.

[43] Osnas J L D, Lichstein J W, Reich P B, Pacala S W. Global leaf trait relationships: mass, area, and the leaf economics spectrum. Science, 2013, 340(6133): 741-744.

[44] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, Fram M S, Fujii R, Mopper K. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. Environmental Science & Technology, 2003, 37(20): 4702-4708.

[45] Hättenschwiler S, Vitousek P M. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(6): 238-243.

[46] Janhom T, Wattanachira S, Pavasant P. Characterization of brewery wastewater with spectrofluorometry analysis. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2): 1184-1190.

[47] Kaiser K, Guggenberger G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils. Organic Geochemistry, 2000, 31(7/8): 711-725.

[48] Virtanen R, Luoto M, Rämä T, Mikkola K, Hjort J, Grytnes J A, Birks H J B. Recent vegetation changes at the high-latitude tree line ecotone are controlled by geomorphological disturbance, productivity and diversity. Global Ecology & Biogeography, 2010, 19(6): 810-821.

[49] Calderón F J, McCarty G W, Reeves III J B. Pyrolisis-MS and FT-IR analysis of fresh and decomposed dairy manure. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2006, 76(1/2): 14-23.

chinaXiv:201806.00059v1

www.ecologica.cn